

第 2 章 动态测试概论

2.1 动态测试的意义

机械、船舶、动力与能源、航天与航空、建筑等工程中，动态测试实际上就是通过传感器、放大仪表和显示或记录仪器，测量运动机械或工程结构在外激励或环境激励下或运行工况中其重要部位的位移、速度与加速度等运动量（响应），从时域和频域两方面来了解机械或结构的工作性态；通过对运动量（响应）的分析和深入再试验，人们欲了解机械或结构的动特性，如它们相对自己的静平衡位置的微振动固有频率、相应的固有模态振型、模态阻尼和模态刚度等特性参数，为机械或工程结构的动力优化设计服务。这样，动态测试实际包括运动量的测量和动特性参数的识别。

现代机械与结构均向着高速、轻质、大型及高效、高精度方向发展，故它们也易发生振动，由此引起的事故和问题日益突出。限制它们的振动响应或增强它们的抗振能力成为设计工作者必须关注的要点。于是，仅作设计计算就远远不够，常须作模型测试来检验计算的正确性或寻找弥补计算不足的途径；对于复杂机械或结构，欲确保其动特性参数落在一定的范围，往往需要直接通过模型试验获得必要的的数据以建立其动力学模型，作动力修改仿真计算与再试验，直至达到目的。新的机器或结构制造好后，须通过动态测试鉴定其设计性能。可见，分析计算与动态测试是成功设计的必要两手。

机器在运行过程中产生振动是不可避免的，而人们认为是不动的工程或建筑结构在环境激励下也会振动。动态测试可获得振动响应信号，人们不仅可根据其提供的信息发现机械或结构的动态特性，经过适当处理，还能反映机器的运行状态和结构的损伤状态。采用动态测试对机器进行故障诊断和对结构进行损伤检测已成长为一门新兴前沿学科。

动态测试现已在机械、船舶、动力与能源、航天与航空、建筑等工程中起着不可替

代的重要作用。动态测试与分析技术还综合与交叉了传感器技术、现代电子学、信号分析与处理、自控理论和计算机技术等学科的知识与最新发展成果，已形成一门独立、新兴的高科技学科，有着不可估量的发展前景。

2.2 动态测试系统的构成

动态测试系统通常具有以下三部分：

1. 激振系统。激振系统由激振设备和被测机械或结构组成。各种型式（电磁、电液伺服）振动台，机械式的偏心激振器，激振锤（力传感器）等都是激振设备。
2. 测量系统。测量系统由一次仪表（传感器、变换装置、测量电路）和二次仪表（放大、显示、记录、处理）组成，将被测物理量检出和变换（非电量变成电量），以作分析与研究。

现在测量系统有模拟测量系统和数字测量系统两种。其中，模拟测量系统将一般为非电量的被测物理量变换为阻抗（电阻、电容、电感）或电压、电流，然后将这些电量转化为指针位移、记录曲线等模拟量，进行显示、记录。而数字测量系统也是将一般为非电量的被测物理量变换为阻抗（电阻、电容、电感）或电压、电流，然后将这些电量转化为二进制或十进制的数码，进行显示、记录、运算。后者建立在电子计算机技术基础上，更为先进和有效。

3. 分析系统。分析系统可将测量结果加以处理，根据研究要求或目的获得各种参数和图表。目前微型计算机技术高速发展，已有功能十分强大的商用软件来完成分析系统的工作。

2.3 动态测试仪器的性能指标

1) 灵敏度

灵敏度通常为仪器的输出与输入之比。不同类型测量仪器，灵敏度的表达方式不同。机械式的测振仪，其灵敏度表示为输出机械量与输入机械量的比。如千分表，通过顶杆的接触将振动体的振动位移 0.01mm 转换成顶杆的运动，经过杠杆系统放大后，显示刻度盘走 1 格，距离为 1mm 。故灵敏度等于 $1\text{mm}/0.01\text{mm}=100$ ，也即放大倍数。

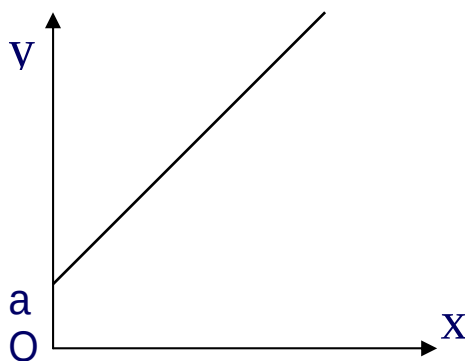


图 灵敏度

动圈式的电磁式传感器，其灵敏度是输出电压量与输入运动量的比。如速度传感器，通过发电原理将振动速度量转换成电量，它的灵敏度可写成 $S = U_m / V_m$ ，其中 V_m 是测点振动速度 $v = V_m \sin \omega t$ 的幅值， U_m 是传感器输出电压信号 $u = U_m \sin \omega t$ 的幅值。

动态测试中，凡使用机械量转换为电量形式的仪器，其灵敏度可类似于动圈式的电磁式传感器。若显示值为峰值、有效值和平均值中的任一种，则灵敏度须为同种量度值之比。

2) 分辨率

引起仪器输出量发生可分辨的变化的最小输入量，称为仪器的分辨率。如千分表的最小刻度是 0.01mm ，即为它的分辨率。传感器有自身的分辨率，整个测量系统有其整体的分辨率。

分辨率还受仪器或系统的噪声电平的影响，故分辨率与信噪比有关。丹麦 BK 公司规定，最低可测信号电平 S 与噪声电平 N 之比的分贝值是

$$20\lg\left(\frac{S}{N}\right) \leq 5\text{dB}$$

这时可测信号电压约是噪声电压的 1.77 倍。

3) 线性度

当一个仪器的灵敏度在一定限度内波动而不越出，那末这一限度称为仪器的线性度，线性度实际上是灵敏度在正常情况下的误差范围。任何仪器只能在一定的幅值范围内保证线性度。范围的低端称最低可测幅度，由分辨率决定。范围的高端决定仪器的最高可测幅度，取决于仪器的电性能或结构。

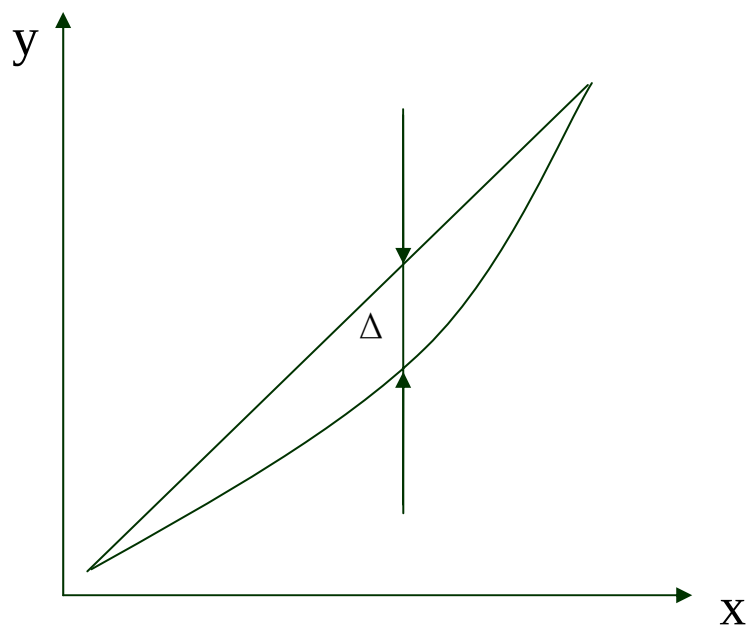


图 线性度

4) 频率范围

频率范围一般指仪器灵敏度变化不超过某一规定百分比下，仪器的使用频率范围。有的仪器还要求输入的正弦波和输出的正弦波间的相移不超出某限度，仪器的使用频率范围也得满足这一要求。仪器的频率范围取决于自身的电气性能或机械性能，也取决于附加线路或配合仪表的性能。

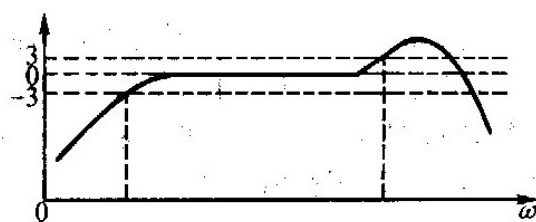


图 频率范围

5) 工作范围

频率范围加上线性度范围确定仪器的工作范围。

2.4 分贝的由来与表示

工程动态测试中，有时测量值的动态变化范围很大。如，振动物体在定幅值力作用下的响应随激励频率的变化而波动，最大值往往为最小值的数十倍。为了描述整个动态范围的变化，需要一种坐标表示法，既能容纳小值，又包含很大的变化范围。最初，人们找到对数标尺，但由于它是一种不均匀刻度的标尺，不能令人满意。

分贝标尺起源于传输线和电话工程，它具有刻度均匀又有大范围压缩的优点，现已广泛用于电子工程，也广泛用于振动与声工程。

分贝的定义基于增益或功率比，增益的定义为

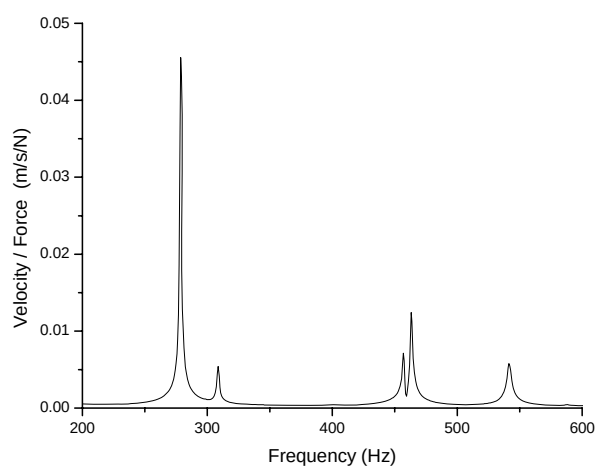
$$L = \lg\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

式中， P_0 是参考或基准功率， P 是欲比较的功率， L 的单位为 *Bel*。

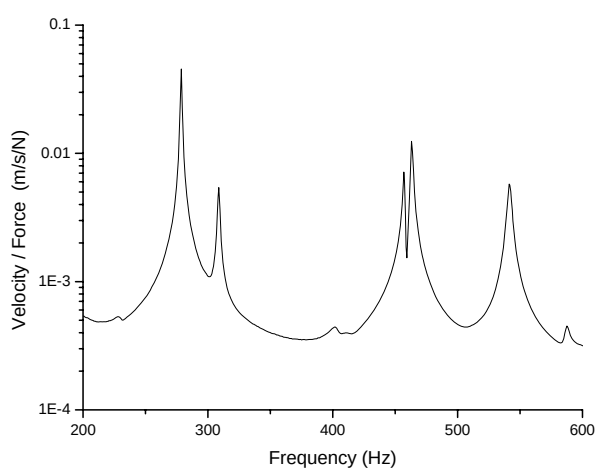
在振动工程中，通常以响应量 A 作比较值，它们与功率成平方关系，故有

$$L = \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) = \lg\left(\frac{A}{A_0}\right)^2 = 2 \lg\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (\text{Bel})$$

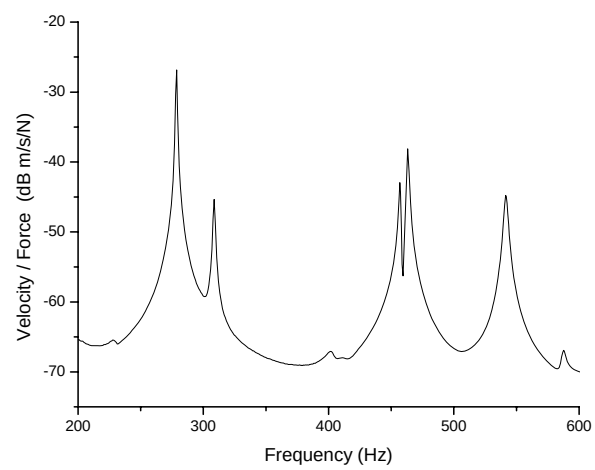
但 *Bel* 作为单位，工程上嫌大些，故取其十分之一称为分贝，作为单位。因此，



(a)



(b)



(c)

图 线性、对数、分贝尺度表示

$$L = 20 \lg \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (\text{分贝, 记作 } dB)$$

在声工程中, A 可为声压 p 。参考声压 $p_0 = 20 \times 10^{-6} Pa$, 这是在 1000Hz 时, 人的耳朵刚能听到的声音之声压。以 p_0 为参考基准, ISO1967 标准规定人的 8 小时工作环境的最高噪声不超过 85dB。

在振动工程中, 很难定出基准响应 A_0 , 故通常求两个响应量的增益

$$L = 20 \lg \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (dB)$$

A 可以是位移, 也可是速度或加速度。例如, 在半功率点处, 位移响应的振幅 A_2 与峰值 A_1 之比为

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \text{于是}$$

$$L = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{2}} = -3dB$$

负值表示降低, 即半功率点位于峰值以下 3 dB 处。

下面给出几组 $L(dB)$ 与 A_2 / A_1 的对应关系

$L(dB)$	A_2 / A_1	$L(dB)$	A_2 / A_1
0	1	0	1
10	3.16227766	-10	0.316227766
20	10	-20	0.1
30	31.6227766	-30	0.0316227766
40	100	-40	0.01
20n	10^n	-20n	10^{-n}

2.5 测量误差

测量误差来自多种因素，但大致有以下三种形式：

- 1) 系统误差—往往是数值或符号按一定规律变化的误差
- 2) 偶然误差—数值与符号都不固定的误差，这些误差的出现和变化规律在测量的当时不能为人们确切了解，但在大量的重复测量中，可发现它们以统计规律分布出现
- 3) 疏忽误差—测量中不应有的误差，特别在把某些已考验过的测量方法作不正确的简化，或不完全了解测量设备的使用方法时最易产生，包含了疏忽误差的测量结果是不可靠的，尽量舍弃不用